第3章 開発の各段階における放熱設計への取り組み方

短期開発やコスト削減には回路，機構，配線パターン設計者の協調設計が必須

橘 純一

放熱設計は，回路設計者，機構設計者のどちらが行うのだろうか．多くの場合，機構設計者が主となり，試作の各段階で放熱対策を施しているだろう．ところが，機器の小型・高密度化が進み，製品の開発サイクルも短くなった現在，機構設計者に任せきりでは放熱設計そのものが成り立たなくなっている．ここでは，製品開発の各段階において，回路設計者や機構設計者が，放熱設計にどのように取り組むべきなのかを紹介する．（編集部）

電気的な仕様が支配的な製品を開発する場合，また，そのような場合に限らず電子機器の開発を行う場合，どの時点から放熱を考慮するべきでしょうか．放熱の考慮といっても，どのような方法が考えられるでしょうか．

通常，この放熱に関する設計は，具体的な冷却方法やヒートシンクの選定など，機構設計者の守備範囲のものが多い反面，回路設計者の守備範囲でもある部品配置にも密接に関係しています．従って，両者の共同作業が不可欠となります．しかし，開発の初期の段階ではまず，電気的な仕様を満足することが先決となりがちです．特に難しい課題があったり，部品の開発に依存するような要素があったりすると，放熱という視点はどうしても後回しになります．ただし，後になって足をすくわれないように，開発の初期の段階から放熱に関して注意を払っておく必要があります．

では，具体的にどのように進めればよいのでしょうか．測定器を開発する例を中心に，各開発段階（**図1**）に沿って見ていきます．

図1　製品の開発の流れ
問題点はできるだけ前の工程でつぶしておく．

1 仕様検討段階

仕様検討段階では，開発する製品の概要を検討します．どのような製品を作るのか，コンセプトを決定する重要な段階です．まずはマーケティング部門が主体となって顧客の要望を洗い出し，どのくらいの需要が見込めるのかを検討します．

製品化して売れる見込みがあると判断すれば，技術的に実現可能なのか裏付けを取っていくことになります．この段階ではまだ，検討項目自体が明確でなかったり，選択肢がたくさんあったりと，技術的な視点から見ると非常に抽象的です．この抽象的な事柄を，仕様をにらみつつ具体化していく作業となります．技術的な詳細ではなく，実現が可能かどうか，可能とするにはどのような課題があるのか，

KeyWord　TO-220，ヒートシンク，ヒートパイプ，熱電対，サーマル・シート，グリス，サーモ・ビューア，デバイスの寸法誤差，放熱シミュレータ，メッシュ，サーモ・ラベル

という視点での検討になります．特に測定器の場合は電気的な仕様を中心に検討が進められます．

電気的な仕様を決める際にはまず，求められる仕様をはっきりさせ，どのように実現していくかを検討していきます．測定器の場合，これらの作業は電気系エンジニアが中心となり，マーケティング部門などと協議をしながら進めることになります．この段階では仕様を満足させるためにどのような技術を利用するか，いくつか候補を挙げて長所と短所を検討し，候補を絞っていきます．

(a) ヒート・スプレッダ　(b) ヒート・スラグ

図2[1]　多層リードフレーム構造
半導体素子の高集積化による高消費電力化に対し，パッケージのある種類は放熱板を内蔵し，低熱抵抗化を図っている．

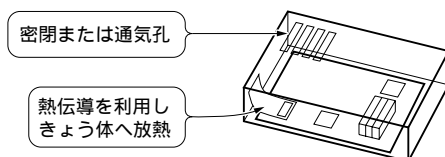
テクニック&ノウハウ 1　部品を見きわめ，放熱性を検討する

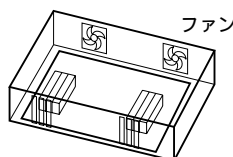
候補を検討するには，性能を大きく左右するようなキーとなる部品を決め，ブロック図レベルで回路が検討されます．従って，この段階で技術的な詳細を検討するのはまだ早いのですが，部品の入手性などは調査することになるので，この時点から放熱に関して注意を払っておく必要があります．

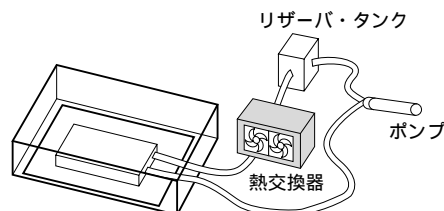
なぜなら近年，部品内部の高密度化が進み，局部的に大きな発熱とならないように，部品にも放熱を考慮した複数のパッケージがラインアップされることが増えているからです(**図2**)．自社の製品にマッチした冷却方法が採れるパッケージを選定し，問題なく入手できることを確認しておきます．

コンセプトを固めていくには，このように仕様やキー・デバイス，開発する回路，放熱方法などを総合的に検討する必要があります．これらのどれを優先するかは，製品によって異なってきますが，全部を問題なく満足するような状況になることは少ないので，あちらを採り入れてはこちらを外し，こちらを採り入れてはあちらを外し，といった地道な作業で落としどころを探ることになります．現在多くの機器に求められる軽薄短小の要求を満たすには，放熱が大きな鍵になっています．従ってこのようなコンセプト設計の段階から放熱をケアすることが必須となります．

テクニック&ノウハウ 2　冷却の方式で目標コストや外形，リサイクル容易性が変わる

キーとなる部品がはっきりしてきたら，放熱方法の検討を進めます．場合によっては冷却方法により，キー・デバイスがおのずと選定されることもあります．冷却方法は大きく自然空冷，強制空冷，水冷に分類されます(**図3**)．この中のどの方式を採用するかで製品の構成を大きく左右す

ファンなどを用いずに熱伝導や熱により発生する対流を利用して冷却を行う．シンプルで故障の少ない冷却方法だが，冷却能力としてはあまり高くない

(a) 自然空冷

ファンなどで強制的に空気を移動させ冷却を行う．発熱部分へ効果的に風をあてることで，自然空冷にくらべ冷却能力は格段に上昇する．ファンの能力や配置，部品との位置関係などを十分に考慮する

(b) 強制空冷

ヒートシンクの内部に水を通し，発熱部品の熱をその水まで伝導させて放熱を行う．水によって運び出された熱は，別途用意された熱交換機によって最終的には空気に放熱される．このように熱交換器や水を循環させるポンプなど複数の設備が必要となるが，空気と比べて圧倒的に大きな比熱により，多くの熱を機器外部に効果的に運び出すことが可能

(c) 水冷

図3　一般的な冷却方法
どの方式を採用するかで製品の構成が大きく変わる．

るので，早い段階での判断が必要です．言い換えると，採用する冷却方法によって目標とするコストや外形，使用環境，サポート体制，リサイクル性能が変わるのです．

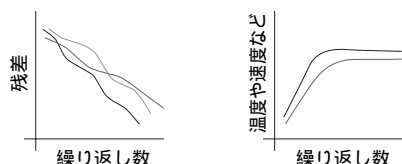
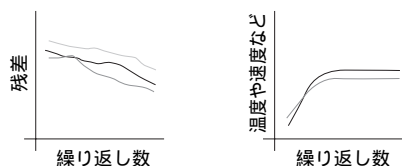
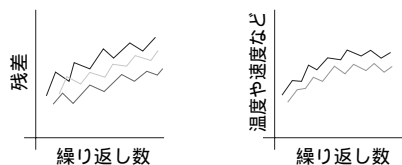
冷却方式にまでさかのぼって採用の可否を判断できるのは，この仕様検討の段階までです．開発段階に入ってから問題点が明らかになったなどの理由で冷却方式を代えるとなると，おのずと仕様検討の段階まで戻って，コンセプトから再度検討する必要が出てきます．非常に大きな手戻りとなり，開発期間の大幅な延長にもつながります．

テクニック&ノウハウ 3 仕様検討段階であっても，放熱設計に対するマージンを持っておく

仕様検討段階では，将来予想される変更に対応できるよ

☛ COLUMN 放熱シミュレータの使い方の勘どころ

放熱シミュレータの使い方は，メーカによってさまざまですが，最初に系全体にかかわる条件を設定し，その後部品単位の細かな条件設定を行い，メッシュを切って計算するという手順が一般的です．

これら条件設定に必要なパラメータは，データシートなどを参照しながら入力するケースが大半です．また，メッシュを切る作業も，自動メッシュ作成の機能が充実してきており，モデルができてさえいれば計算を始めるところまではさほど苦労なくたどり着けます．実はシミュレータを使う上で問題となってくるのはこの先です．計算を収束させることと，その後無事収束して出てきた結果をどのように判断するか，という点です．

図A　residual(残差)の遷移

シミュレータのモデルやパラメータが間違っていて，計算が収束しないときresidual(残差)の遷移が参考になる．

● 計算を収束させる

計算が収束しないとき，原因としては大きく二つ考えられます．一つはモデルやパラメータが間違っている場合，もう一つは間違っていなくても計算上不都合がある場合です．モデルやパラメータが間違っている場合は，もちろん修正すればよいのですが，大抵はどこが間違っているのか探し出すのが困難です．このようなときには，計算経過としてのresidual(残差)の遷移が参考になります(**図A**)．

温度や流速など，どのresidualが収束せずに残っているのかが確認できれば，間違いを特定する手がかりになります．発散したりばらばらの動きがあったりするようだと，パラメータの入力ミスやメッシュ作成時の致命的なエラーの可能性が高くなります．

また，知りたい部分の温度の計算値がどのように遷移しているか見てみます．計算が収束していなくても，温度が一定の値に落ち着いている場合は計算上の不都合であって，モデルの間違いが原因ではない可能性があります．計算が収束していなくても，ひとまず途中までで全体の結果を見てみるのも有効です．

流れや温度分布におかしな点が見つかれば，その周辺を重点的にチェックしていきます．モデルやパラメータに間違いがなければ，必ず計算が収束するとは限りません．モデルの規模の割に発熱量が少ない場合は，収束の傾向にあっても収束しきれないことが多いからです．また，空気や冷却水の通り道に大きな障害物があって，流れを妨げている場合なども，収束しづらくなります．

● シミュレーションの精度を上げる

シミュレータはモデルに多少の矛盾があっても，計算を収束させて結果を出してしまうことがあります．この場合は正しく計算できたときとほとんど見分けが付きません．シミュレータの方式にもよりますが，このような状況の原因としてメッシュ作成時に極小なメッシュを自動で無視する機能が考えられます(**図B**)．

多くのシミュレータでは，メッシュ作成時にモデル全体をどの程度の密度でメッシュを切るのか指定できます．密度を高く指定すれば計算の精度も向上しますが，シェル数が多くなり計算に時間が掛かります．密度を低く指定すると，計算の精度は低下しますが，早く計算が終わります．この機能と連動して，最小のシェル・サイズが指定され，それ以下のサイズのシェルは作成されません．このようにある程度小さなメッシュを切らないことにより，計算を高速化することができるのです．

従って，荒い密度を指定したメッシュ作成では，場合によって必要であるにもかかわらずサイズが小さいために無視されるメッシュが

うに，設計にある程度のマージンを持っておくことが必要です．仕様決定の初期から放熱を考慮しておくことにより，後でつじつま合わせをするのではなく，詳細の設計に入ったときに発生する課題に予想の範囲内で対応することが可能となります．

仕様や電気的な回路の基本が固まってから放熱を検討したのでは，後手に回ってしまい適切な設計ができません．さらに，製品としてまとまりの欠けるものになり，さまざまな点でマージンが少なく応用の利かない設計になってしまう可能性があります．試作初期からゆとりのない設計を行ってしまうと，後で発生するかもしれない予想外の課題に対する対応方法までもが大きく変わってきます．

発生します．その範囲に部品が入っていると，部品そのものが無効化されたり，隣の部品との間にあるはずの空間がなくなって密着してしまうことがあります．メッシュ作成時に出てくるワーニングやエラーに注意し，特に重要な部分については目視してでもメッシュの作成状況をチェックし，結果に矛盾がないかどうかを吟味します．

● 温度を正確に測る方法

シミュレーション結果を実測結果に近づけるには，部品のどの部分の温度を測定するべきかを見極めることが必要です．そこで，接触面における熱抵抗を算出するときの具体的な手順の一部を紹介します．

まずは発熱と放熱の両側の温度を測定しなければなりません．接触面両側の温度をできるだけ直接的に反映しているような部分を選択します．それを理解するには部品を分解する方法もあります（**写真A**）．

ニッパを使いモールドを割って，中を見ます．分解されたTO-220パッケージのモールドにはまり込んでいる白い部分がダイです．このサイズと熱抵抗値は密接な関係があります．中央の足はグラウンド面と一体なのが分かります．両側の足はダイからボンディング・ワイヤで接続されています．そこで，中央の足の付け根の温度が使えそうだと見当が付きます（**図C**）．基板やヒートシンクに接触している近辺よりもダイの裏面の温度に近い値が取れます．せっかく内部の構造が分かったのでモデルにも反映します．

モールド面にヒートシンクを取り付けたらどうなるでしょうか．このデバイスはグラウンドの放熱面から大部分の熱を放出するので，モールド面にヒートシンクを接触させてもほとんど放熱しません．このように一見余分と思われるような実験も，部品を理解する上では有効です．

写真A　分解したTO-220パッケージ

図B　ヒートシンクにメッシュを切った例
密度を高く指定すれば計算の精度も向上するが，シェル数が多くなり計算に時間が掛かる．

図C　TO-220をヒートシンクにねじ止めした際の断面
どの部分の温度をどのように測るか．ヒートシンクと部品の接触状態は温度にどのように影響するか．ねじの締め付けトルクはどのようにシミュレーション結果と整合をとるのか．

テクニック&ノウハウ 4 回路図はブロック図レベル，半導体データシートが手がかりに

仕様や設計コンセプトが固まってきたら，放熱の実現性の検討に入ります．回路図はまだブロック図レベルなので，放熱設計も詳細を詰めるのは困難です．ただし，予想される問題個所はおおかた見当が付くので，その周囲の情報をできるだけ集めます．そして，それらの情報は早めにリスト化しておくことが大切です．必要な情報，不足している情報が明確になり，新たに追加した部品が適当かどうかのおおよその判断も付きやすくなります．

情報のソースとして，半導体デバイスでは，データシートが重要な手がかりとなります．θ_{ja}，θ_{jc}などの熱抵抗値は基本的な情報です．熱に敏感な部品においては，冷却の参考例やジャンクション温度を測定するために仕込まれたダイオードの使い方などが親切に書かれている場合があります．これは優先的に最大限利用しましょう．なぜなら，この部品を設計した人たちが冷却方法の解説をしているので，最も筋の良い冷却を実行できるからです．そこからは，どうすべきであって，どうすべきでないかが読み取れるはずです．

テクニック&ノウハウ 5 シミュレータを活用する

シミュレーション・ツールが利用できる場合は，この段階から積極的に利用します．最近のシミュレータは特別な知識がなくても，エンジニアが自分の設計を検証するために手軽に利用できるように進化しています．熱流体解析では，シミュレーション・モデルも3次元で作成するので，設計を3次元で行っているときは，シミュレータによっては材料情報などを含めたCADデータをシームレスに転送して利用できます．

図4　基礎実験段階における放熱測定
最低限の回路で十分である．とにかく実測しておこう．

設計の途中でシミュレーションを行うことにより，実験を行う前にある程度の結果を予測することができます．また，試作を行わずにいろいろな冷却方法やレイアウトを試すことが可能となります．ただし，これはシミュレーション結果がある程度正しいと見込める場合であり，それをどのように判断するのかが，実はシミュレータを使う上での最大のノウハウとなります．この点については次の試作機を評価する段階で見ていきます．

2 基礎実験段階

基礎実験段階では，新技術の実現性を確認したり，必要な評価項目を検討したりします．

テクニック&ノウハウ 6 早めに計画し，少しでも前倒しで実験を行う

新しい製品を作り出すときは，さまざまなチャレンジが必要になってきます．だれも試したことがない方法や，だれも使ったことがなく，まだ日の目を見ない部品を組み込むことを想定したりと，いろいろな状況が考えられます．製品がこのようなチャレンジの上に成り立っているときは，失敗によるリスクを最小限にとどめるため，少しずつでも実験を行い実現性を確認していく必要があります．

このとき，よほど目立つ部品があるとき以外は，放熱の検討は後回しになります．まずは電気的な仕様を確認し，不確定な部分をつぶすからです．貴重な試作機を利用して，放熱の評価ができるように配慮することは難しい場合が多いので，放熱について考慮する必要がある点は，なるべく早くから実験計画に盛り込み，試作機の設計段階から作り込んでおく必要があります．

テクニック&ノウハウ 7 実験結果を蓄積し，シミュレーションの精度を上げる

基礎実験段階では，シミュレーションの結果と整合を取るためにも，ぜひ実測したデータをたくわえておきましょう（**図4**）．仮に50％の負荷しか掛けられなかったとしても，シミュレーションに50％負荷の結果をフィードバックしてモデルを作り込み，結果に整合が取れれば，100％負荷の状態のシミュレーションにも裏付けが取れるからです．シミュレーションを利用する上で最も大切な点はここにあり，どのような状況を想定し，シミュレーションとフィード

バックができたのかがノウハウなのです．シミュレータのベンダもサプライヤも，機能としてどのようなことができるかは教えてくれるかもしれません．しかし，どうやって実測値と合わせ込むことができるかは，シミュレータを利用するエンジニアの腕に掛かってくるのです．

例えば，TO-220パッケージの部品に，ヒートシンクを取り付けて冷却を行う場合，その接触面はどのようにシミュレーションしたらよいでしょうか．また，接触面にグリスを塗布して，押しつける場合はどのようにモデル化したらよいでしょうか．

通常，シミュレータでは特別な定義を行わない限り，接触している部品は完全に密着した状態で計算されます．しかし，実際にはそのような状態で接触していることはありません．このような場合は実測して結果をフィードバックするしかありません．発熱量が小さい場合は，接触熱抵抗による温度上昇もわずかでしょうから，計算結果と実測値では差が見られないかもしれません．しかし，小さな面積に大きな発熱があるような場合は差分が明確になってきま

COLUMN　温度の測定方法

温度を測定する際には，測定精度に注意が必要です．温度の測定誤差は実際の温度より低い方にしか出ないからです．赤外線検知型などの非接触型測定器を利用する以外は，測定用の素子を対象物に接触させることになります．接触が十分でないと，熱が素子に伝わらず，測定値は実際よりも低い値となってしまいます．高くなることはあり得ません．

● 熱電対

よく利用されている熱電対において，固定する部分にある程度の面積がある場合は，先端をアルミ・テープ（ホームセンタや100円ショップで入手可）を利用すると，しっかり固定できます．アルミ・テープは粘着力も十分で，ある程度伸びるため，熱電対をすき間なく完全に密着させることができ，表面からもその様子がよく見えます．

部品の足の温度を測定する際には，熱電対を直接はんだ付けしてしまいます．ただし，熱電対やアルミ・テープ，はんだは導体なので短絡させないように注意します．C（容量），L（インダクタンス）を加えることになるので，回路の敏感な部分に接触させると問題を起こすことがあります．複数の点を一度に測定する場合は，接続した温度計のグラウンドが共通か絶縁されているかを調べておき，共通の場合は接触させる部分の電位に注意します．やっと確保した熱測定の機会に，そんなことが原因で貴重な試作機を壊すわけにはいきません．

そうは言うものの，基板上の部品の温度を測定するときなど，対象物が小さいと素子を固定するのも容易ではありません．そこで，線径が0.1mm以下の極細の熱電対を活用します．浮き上がりに注意が必要ですが，このような熱電対を接触面の間に挟み込んで測定した温度データも有益です．先端が溶接加工済みのものが用意できればベストです．加工が大変ですが，巻き線で購入しておいて必要に応じて先端の被覆をむき，撚りを加えて自作することも可能です．極細の熱電対を利用すれば基板やヒートシンク側のごく接触面に近い部分の温度も測定できます．

対象物が小さい場合，熱電対が吸い上げてしまう熱量も考慮する必要があります．熱電対が冷却部品として機能することがあるからです．また，サーモ・ラベルを利用すると，この問題だけでなく，絶縁の問題も解決できます．

● サーモ・ラベル

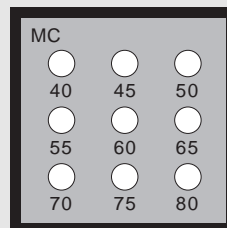
サーモ・ラベルは，一定の温度に達すると変色して元には戻らない不可逆の物質を，ラベルの上に配置したものです．大きさや形状だけでなく，変色する温度もさまざまなレンジのものが製品になっています．測定する前にどの温度レンジのものを貼り付けるか予想を立てる必要がありますが，閉じた空間でも測定できます（**図D**）．

例えば基板の温度分布測定なら，たくさんラベルを貼り付けておいて，測定したい状況に基板をセットします．測定後にラベルのようすを見れば温度分布が一目りょうぜんで，全体の写真を撮ってしまえば即レポートに使えるといった便利さもあります．ラベルの貼り付け面はきれいにしておく必要があります．熱伝導材はシリコーン（Silicones）基材を使っていることが多いので，このような材料を使っていると，貼り付けたい面にシリコーンが回り込んでしっかり固定できないことがあるからです．

● 赤外線カメラ

赤外線検知方式の非接触型を利用する際には，別の注意が必要です．金属面などで反射率が高い場合は，測定したい表面ではなく，その表面が反射した場所の温度を測定してしまう場合があります．

赤外線カメラで見た結果，熱伝導板が青く表示されていて熱の問題がないと思っていたら，実は向こう側にあった本棚の表面の温度を反射していて，実物をさわるとやけどするほど熱くなっていたということもあり得ます．黒い塗料で塗ったり，さらに放射率を補正するなどといった調整が必要になります．

図D サーモ・ラベル
一定の温度に達すると変色して元には戻らない不可逆の物質を，ラベル上に配置したもの．

す．このような実験を，実際に製品で使用することが想定される部品を使って行います．そして，その差分をモデル化してシミュレータに取り込むのです．この例では，寸法がなくても熱抵抗だけ定義できるダミー熱抵抗のような機能がシミュレータに用意されているので，それらを駆使して実測値を反映し，差分を埋めていきます．

テクニック&ノウハウ8 精度を上げておけば，今後生じる問題への対処も楽

発熱源から放熱側までの各地点の温度が測定できたら，シミュレータの計算値と合わせ込んでいきます．ダミーの熱抵抗値や，モールドの熱伝導率を変えたりしてみます．熱シミュレーションと実測値を合わせ込むときには，ヒートシンクとデバイスの間には熱伝導材を介在させておきましょう．両方が金属面であるよりも，熱伝導材を介在させた方が接触状態は安定するからです．ただし熱伝達率は悪化することもあります．

この段階で行ったこれらのフィードバックは，次回からのシミュレーションの確度を向上させるだけでなく，トラブルが発生したときに解決策を検討する場合やシミュレーション結果の説得力向上などに活躍する，貴重な財産となります．

テクニック&ノウハウ9 キー・デバイスは必ず実際に近い状態で動かしてみる

シミュレータが利用できる場面に限らず，コンセプトを決定付けるために必要な項目は，未確認のままにしないで，必要な要素実験は行っておきます．実は製品化が行われるかどうか明確ではないこの段階では，予算を立てることができず，実験費用を工面するのが難しい場合も多いはずです．しかし，放熱については，それほどの投資をしなくても先を見通すための実験はできるものです．

例えば部品であれば，サンプルを入手して，回路設計者に評価してもらい，熱に関するデータを集めます．必要に応じて試作業者で基板を作り，実際の状態に近づけます．最近ではネット上のやりとりだけで，イニシャル・コストを掛けずに非常に安く基板を製作するサービスもあるので便利です．こうして動いた部品の温度を測定します．与えた負荷によってどのように発熱状態が変化するのかはもちろん，温度を測定する場合は部品の表面が適当なのか，それとも裏面なのか，もしかするとグラウンド・ピンが適切なのかなどの評価が可能です．

テクニック&ノウハウ10 電源は熱源，程度を把握しておくべし

基礎実験段階では電源モジュールも評価しておきましょう．最近は小型で高効率なDC-DCコンバータが製品化されており，基板上に実装して使用するケースが増えています．DC-DCコンバータは小型化されており，発熱密度も高いため，かなり高温になる場合があります．モジュール単品では温度に対して非常に気を配ってあり，ある程度温度の高い環境下でも問題ないように作られています．周囲に配置された部品にとってみれば，すぐ近隣に高温の発熱体があるのはやっかいです．とは言うものの，構造上，ヒートシンクなどの放熱部品の取り付けは困難で，冷却は意外と難しいものです．

このようにモジュール化されたデバイスのどの部分が発熱して，どのように冷却するのか，計画を立てるためにも使用状況に応じた実験が必要になります．DC-DCコンバータでは，スイッチング動作用のトランジスタが高温になります．基板はべた配線を多く取ってあり，熱を拡散させているようです．そこでトランジスタの足や基板の表面からの冷却が有効だと予想できます．

発熱部品だけでなく，冷却部品も実験の対象となります．DC-DCコンバータ上のヒートシンクに風を当てたとき，その向きによって冷却効果にどのような変化があるのか，ヒートパイプを使用するときには実装する向きの影響や，曲げなどの形状による影響も確かめておきたい項目です．

テクニック&ノウハウ11 残った問題点…開発段階でどのようにクリアしていくのか計画を練る

いよいよ製品の仕様と技術的な裏付けがまとまってくると，実際に開発を行うかどうかの判断をすることになります．技術的な実現性だけでなく，コストや生産性といった視点も必要になります．放熱部品も製品開発での影響度は高いため，確度を高めた情報で判断する必要があります．また，この時点で判断しきれないような場合でも，開発段階でどのようにクリアしていくのか，課題を網羅し問題点を予想して開発，設計計画を練っておきます．

3 開発，設計段階

仕様検討段階から放熱について十分考慮し，基礎実験で大体の予想が立てられていれば，開発，設計段階に入ってから，放熱が原因で致命的な状況に陥る可能性は低くなっ

ています．開発，設計の実務を行うこの段階では，仕様を確認しながら基礎実験の結果をふまえて詳細設計を進めていきます(**図5**)．

テクニック&ノウハウ 12 基板を冷却部品として利用する

配線パターン設計の際には，放熱の観点から発熱部品の効率的な配置を，機構と構造設計の観点からコネクタなどの配置を考慮しつつ作り込みます．部品レイアウトは，それぞれの設計者が協議しながら進めます．

基板上の部品を冷却するには，基板そのものを冷却部品として利用することが有効です．それにはレイアウトだけでなく，べたグラウンドなどのパターンを工夫したり，サーマル・ビアを打って基板の垂直方向への伝熱を促進したりする必要があります．これらは配線パターンと干渉しないようにするだけでなく，相互に重複やむだがなく利用できるようにしていかなくてはなりません．

テクニック&ノウハウ 13 基板のきょう体へのねじ止め…硬めの熱伝導材を使う

基板を冷却部材として使用するのは効果的ですが，やはり最終的には基板から空気やきょう体を使って熱を伝達させる必要があります．きょう体に基板を固定するときに，放熱を目的として熱伝導材を介在させる場合は注意が必要です．一般的にある程度の弾力があるものが多いので，基板ときょう体の間に挟んでねじ止めをすると，ネジの周囲だけ熱伝導材が圧縮されて基板がゆがむことがあります．このような現象を防ぐために硬めの熱伝導材を選択したり，基板の固定穴周辺のパターンをべたで固めるといったことが有効です．

テクニック&ノウハウ 14 きょう体と接触する部分はレジストのないべたパターンで

きょう体と接触する基板面にビアや配線パターンがあると，その部分しか接触しなくなってしまいます．できるだけ均一な面にするために，きょう体と接触する部分は電位のないべたパターンにして，レジストもなくしてしまいます．このようにした場合，熱伝導材がない方が，熱伝達率がよい場合があります．なお，感圧紙などを利用し，接触の状態を実測しておくのが確実です[注1]．

注1：例えばプレッシャ・スケールなどと呼ばれるシートを利用して，基板ときょう体がどのような圧力分布で接触しているか確認する．例えば，富士フィルムのプレスケールがある．http://www.prescale.com/JP/J.htm

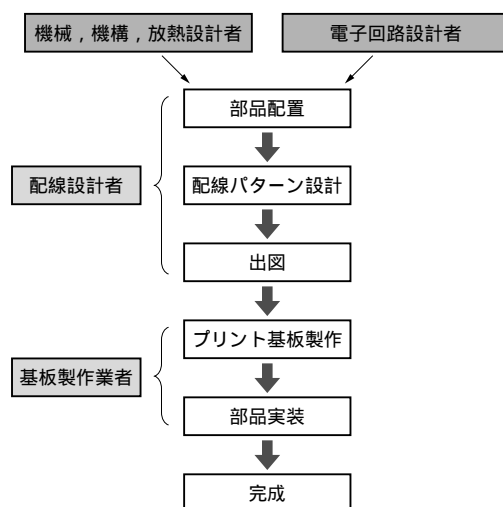



図5　プリント基板ができる過程
部品レイアウトは，それぞれの設計者が協議しながら進める．

テクニック&ノウハウ 15 配線パターン設計に入る前に，回路，機械，配線設計者が一緒にレビューする

部品配置が完了すると配線作業に移ります．それらが完了してから機構設計が入ったのでは，ほとんど何も手を付けることができません．基板設計CADでは自動配線などの機能も充実しつつありますが，パターンの細部は人力で引いているのが現状です．特にインピーダンス・コントロールや配線長を考慮しているような高度な基板では，部品を動かすことは，配線をゼロからやり直すこともあります．遅くとも配線設計に入る前に，回路，機械，配線パターンの各設計者がひざをつき合わせてレビューをする機会を何度か設けておくべきです．

テクニック&ノウハウ 16 連携の効果…冷却の工夫だけで対応できなければ，電源分割などを検討する

理想的なチームワークが構築できていても，予想通りに進むことばかりではありません．見積もりが間違っていたために，予想以上に発熱してしまったり，想定していなかったところが発熱した，部品の精度が出ていない，シミュレーションと違う結果になった，仕様の変更が必要になって放熱設計に影響が出てきたなどということは普通に起こりえます．このような場合は一体どのように対応したらよいのでしょうか．

測定器など電気的な仕様が鍵を握るような製品の場合は，放熱対策を採ることで仕様に影響がないように努力します．この場合でも対策は，冷却，回路，配置などの要素を切り離すことなく，連携して行うべきです．

例えば，基板に実装された電源レギュレータが過熱している場合，ヒートシンクを取り付けたりファンを大きくしたりと，冷却で工夫する余地があったとしても，それだけで熱を抑え込むのはなかなか困難です．そこで，レギュレータを分割して1個当たりの消費電力を減らしたり，電源の配分を変えたりすることができれば，問題の解決もかなりスムーズに行えるようになります（**図6**）．このように各エンジニアが連携して解決策を見つけられるようになるには，熱に対する関心の高さと，普段からのコミュニケーションが大切です．

テクニック&ノウハウ 17 消費電力が小さいデバイスでも，パッケージや配置が問題になることも

発熱が予想されていなかったために，後で問題になるケースもあります．放熱を考慮する際には消費電力だけでなく，パッケージの大きさや種類も大きく影響してきます．ここで，消費電力が小さいために発熱部品をリストアップする際に，リストから漏れてしまうこともあります．

例えば基板上の部品を早いうちからリストアップし，その中で放熱が必要な部品をピックアップして準備を整えていたとします．ピックアップの方法として，ある決まった消費電力を想定していた場合は，残念ながら問題の原因となることがあります．ある基板で強制空冷を行うため，1W以上の消費電力の部品はヒートシンクを取り付け，それ以下は部品上面を通る風で冷却する，といった条件設定の場合です．冷却で問題になるのは消費電力だけでなく，パッケージの状態やそれがどこに配置されるかといったことも含まれるからです．

たとえ発熱量が0.1Wでも，小さなパッケージで熱抵抗や熱密度が高い場合は冷却が破たんする可能性が高くなります．このようなデバイスは冷却がさほど考慮されていないものも多く，面積も小さいため，後で放熱上問題があることが発覚すると冷却方法に苦労することがあります．熱抵抗値を調べておいて，ジャンクション温度T_jで判断できれば，このような漏れは減らすことができます（**図7**）．

テクニック&ノウハウ 18 放熱に対する感覚を磨くには基礎実験とデータの積み重ねが必要

T_jまで考慮して部品のピックアップを行ったとしても，配置を行う上で消費電力が高い部品が集まってしまうと冷却しきれなくなってしまいます．こうなってくると手作業で事前に問題を把握するのは困難になってきます．シミュレータなどのツールを利用したり，感覚的なものに頼ったりする必要が出てきます．この感覚を磨くためにも基礎的な実験を地道に行って，データを蓄積していくことも必要です．

4 試作評価段階

試作が完成すると，いよいよ評価が始まります．完成品のチェック，電源の投入，回路の動作検証へと作業は進みます．放熱の評価が可能となるのは，一通り回路が安定して動作し，仕様を満足しているかなど，ある程度の性能の確認が取れてからとなります．

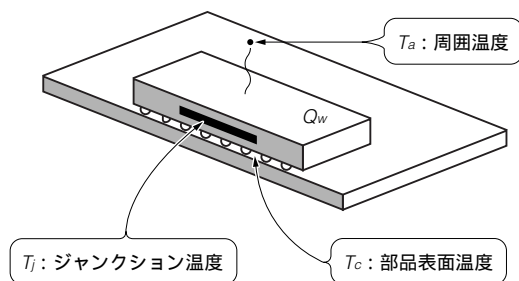
図6 各設計者が連携したときの効果
電源分割などを検討できる．

$T_j = T_a + Q\theta_{ja}$ または $T_j = T_c + Q\theta_{jc}$
ただし，Q：部品の発熱量（W），θ_{ja}とθ_{jc}：θは熱抵抗を表す（℃/WまたはK/W），jaはjuncyion to airの略であり部品発熱部（接合部）から外気までを指す，jcはjunction to caseの略．

図7 ジャンクション温度の見積もりかた
ジャンクション温度を何℃に抑えるか．熱を逃がす対象の温度とそこまでの熱抵抗が鍵となる．

テクニック&ノウハウ 19 数が少ない試作機を借りるために評価予定を組んでおく

放熱部品は電子部品を覆い隠してしまうことが多いので，回路検証時には邪魔になりがちです．また，放熱の評価ができるほど負荷を掛けられるようになるのも，回路が安定して動作していることが前提だからです．従って，どの時期にどの程度の評価が可能となるか事前に予定を組んでおく必要があります．試作完成後は電気系エンジニアは回路を動作させることで大忙しのはずですし，放熱の評価を行うには，そのための適切な状況を彼らに作り上げてもらわなくてはならないからです．これらの準備を基板設計終了後から試作品が納品されるまでの比較的時間に余裕のある時期に行っておくことが大切です．

テクニック&ノウハウ 20 測定結果を逐次フィードバックしながらシミュレーションを繰り返す

評価時に注意する点は，基礎実験のときと基本的に同じです．ただし開発時の評価においては，製品としての評価を行うので，基礎実験とは別の項目が出てきます．例えば，実験ベンチで温度を測定している場合，周囲温度は製品仕様の最悪値より低いことが普通です．また，回路規模の大きな製品の場合は，実際の使用状況を模擬できるような装置をそろえて評価ができるのはずっと後になってしまうことがあります．このように一部の測定結果から製品の動作時の状態を想定した評価結果を導き出す必要があります．この点でも基礎実験のときのように，測定結果を逐次フィードバックしたシミュレーション・モデルが力を発揮してくれます．

テクニック&ノウハウ 21 製造安定性に配慮する…ねじの緩みがデバイス温度を左右することも

製品としてリリースするには製造容易性についても考慮する必要があります．どんなに優れた性能が出ていても，製造することができなくては製品になりえません．特に放熱については部品同士の接触状態やサーマル・シート，グリスなどの介在物の管理が重要になってきます．

問題なく放熱させるためには，特殊な技術を必要とせずに安定した組み立て結果が得られるようにしなくてはなりません．そのためには，基板上の部品では基板厚や部品の寸法，アセンブリ精度を把握し，部品の容易かつ的確な位置決め方法，取り付けネジのトルク管理，正しく組み立てられていることが簡単に判断できるような仕組みが必要になってきます．ちょっとしたねじの緩みが部品の温度を何十℃も左右することがあります．

サーマル・シートは部品の間に挟み込むものなので，忘れてしまっても気づかないことがあります．後で容易にチェックできるように，一部見えるように窓を付けるなどの工夫が必要です．

サーモ・ビューアが利用できるのであれば，動作している基板を撮影するのも有効です．基板全体が一度に確認でき，不具合を起こしている部品が一目りょう然になります．

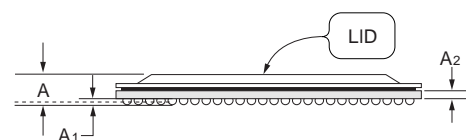
テクニック&ノウハウ 22 電子部品の寸法誤差は実測で絞り込む

ヒートシンクやそれらを固定する部品を設計する場合，接触させる相手は電子部品なので，寸法誤差の管理が難しいことがあります．部品の寸法誤差が大きかったり明確でなかったりするからです（**図8**）．

例えば，部品の高さ寸法が最大値しか記載されていないことがあります．また，BGA（ball grid array）パッケージの場合，リフロー後の高さがどのくらいになるのか正確に予測しきれないこともあります．

誤差に柔軟に対応できるような設計をしたいところですが，与えられた寸法が限られていたりして，余裕がない場合がほとんどです．このようなときは実際に実装したものを測って，誤差を絞り込んでいくしかありません．試作の早いうちに誤差範囲に見当を付け，その後の試作で実績を積んでいきます．

テクニック&ノウハウ 23 電子部品の供給元変更に備え，サーマル・シートの厚みなどに余裕を持たせる

こうして合わせ込んでいくと，入手性の問題などでデバイスの供給元が変われば再度，評価が必要になることがあります．このようなことが分かっている場合は誤差を許容できるように厚めのサーマル・シートを使っておくなどの工夫が必要になってきます．

項目	最小		最大
A	2.35	～	3.00
A1	0.40	～	0.60
A2	0.65	～	1.00

単位：mm

図8　デバイス外形の寸法表示例

BGAパッケージの場合，リフロー後の高さがどのくらいになるのか正確に予測しきれないことがある．

テクニック&ノウハウ24 基板も電子部品と同様に実測して誤差を絞り込んでいく

同じように基板の厚みの誤差が問題になることがあります．基板の厚みの誤差は大抵±10％程度を見込む必要があります．これ以上の精度を要求しても，歩留まりを落として高価になってしまうだけなので，特殊な事情がない限り対応しなくてはなりません．パターンやべたグラウンドの配置によっては同じ基板の中でも厚みが異なってきます．さらに，部品を実装すると反りも発生します．部品のレイアウトが偏っていたために実装後の反りの原因となってしまうこともあります．

このように基板には，寄生している誤差がたくさんあります．基板は厚みがばらついて反るものだと思って，きょう体や冷却部品を設計する必要があります．もちろん基板製作や実装の工程を改善して，根本的に問題を解決する姿勢は必要ですが，すべて追い込める問題ではありません．これも基板上の電子部品と同じように実測して，ある程度誤差を絞り込んでいくことになります．

テクニック&ノウハウ25 基板厚み誤差が大きいとき…放熱が必要な部品はきょう体への基板取り付け面と同じ面に配置する

最初の試作では，机上の計算で予測を立てて製作するので，部品や基板の誤差が予想外に大きく，干渉を起こしたりすることもあります．誤差が追い込めない部分は許容できるように，設計を変更する必要があります．電子部品と冷却部品を接触させる部分であれば，間に介在させる熱伝導材を厚く柔らかいものに変えたりします．

基板の厚みが問題になるときは，基板が固定されている面を基準にして問題となる部品をその面に配置することにより，厚みの誤差を回避します．

反りは基板の固定方法を工夫することである程度抑え込むことができますが限度があります．反っている基板を矯正すると，はんだ接続部，特にBGAのコンタクト部に悪影響があります．工程の改善や場合によってはレイアウトに変更が必要になってしまうことがあります．

5 開発終了後

テクニック&ノウハウ26 製品の構想段階からかかわった放熱に関するノウハウをまとめておく

開発が終了し，製造移管まで完了したら，これまで行ってきたことを整理し，まとめましょう．全く別の担当者が今回の製品を引き継ぐことになっても，その資料があれば滞りなくプロジェクトが始められるようにまとまっているのが理想です．また，放熱設計については，製品の構想段階からかかわったことや，行った評価，得られた結果をいつでも見られるようにまとめておくことは，放熱に関する認知度を向上させ，今後より完成度の高い製品を作っていくためのコミュニケーション・ツールとしても有効に機能するはずです．

テクニック&ノウハウ27 ノウハウをライブラリ化して横展開する

基礎実験時や開発中の評価によりフィードバックが掛けられ，製品の温度状況を再現することができたシミュレーション・モデルは，ノウハウのかたまりとなっているはずです．その中で汎用性があって有効なもの，例えば，例に挙げた「TO-220パッケージの部品にグリスを塗布して，規定トルクでヒートシンクにネジ止めされた場合の接触熱抵抗」などは，ライブラリ化してほかのモデルにも展開できるようにしておきましょう．次回開発する製品の放熱状況が，試作を行うずっと以前から予測できるようになります．

＊　＊　＊

放熱設計そのものの認知度と，そのスキルを持ち合わせるエンジニアの必要性は確実に高まるでしょう．価値が認められ，評価されるようになれば，より洗練された製品の開発が可能となるはずです．

参考・引用*文献

(1)* 多層リードフレーム製造技術，大日本印刷．
http://www.dnp.co.jp/semi/j/lead/04.html
(2) 半導体用サーモカラーセンサー，アセイ工業．
http://www.asey.co.jp/goods/seal/index.html

たちばな・じゅんいち
キーナスデザイン（株）

＜筆者プロフィール＞
橘 純一．1993年キュー・アイ入社．特殊環境用カメラ・ロボットの開発．1997年アジレント・テクノロジー（当時日本ヒューレット・パッカード）勤務．半導体テスタの機構設計を担当．2006年6月キーナスデザインを設立．自社製品開発のかたわら，得意の水冷，放熱，シールドなどを中心に機械設計・製作事業を展開．http://keenus.jp/